

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Nikesha pt.

Hydrodynamic instability and mixing enhancement in grooved channels

wykonana na zlecenie Rady Wydziału Mechanicznego, Energetyki i Lotnictwa
(pismo MEiL-1576/2018 z dnia 19.12. 2018r)

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Nikesha pt.

„Hydrodynamic instability and mixing enhancement in grooved channels”

zawiera od i-xxvii (numeracja rzymska) oraz od 1 -112 ponumerowanych stron Podzielona jest na 7 rozdziałów i dwa dodatki (appendix A i B). Napisana jest w języku angielskim. Liczba pozycji w spisie literatury (Bibliografy) wynosi 74. Liczba rysunków 61. Liczba tabel wynosi: jedna w tekście oraz siedem tabel zamieszczonych w dodatkach. Została wydana w formie książkowej, Warsaw University of Technology, Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Warsaw 2018.

Uzasadnienie podjęcia tematu

W pracy został podjęty temat utraty stabilności przez przepływ laminarny Poiseuille'a w kanale dwuwymiarowym (między płytkami) jak również w kanale prostokątnym, w którym ścianki (dolna i górna) są zaburzone falą sinusoidalną z zadaną amplitudą i częstotliwością, w celu wywołania utraty stabilności przepływu podstawowego. Utrata stabilności przepływu podstawowego powoduje komplikację trajektorii ruchu cząstek płynu, co będzie się przyczyniać do poprawy procesów mieszania. Badania nad stabilnością hydrodynamiczną należą w hydrodynamice do badań fundamentalnych. Jest to ważny i trudny temat mający duże znaczenia zarówno dla teoretyków jak i dla inżynierów. Wybór tematyki pracy doktorskiej uważam za ambitny i ważny.

Charakterystyka tematu badawczego podjętego w pracy

W liniowej teorii hydrodynamicznej badanie stabilności zadanego przepływu bazowego, tradycyjnie dokonuje się przez linearyzację równań ruchu płynu wokół tego bazowego przepływu. Zakłada się

infinitesimalne zaburzenie początkowe jest postaci $\sim e^{i(\alpha x - \sigma t)}$, gdzie $\sigma = \sigma_r + i\sigma_i$ jest liczbą zespoloną). Następnie podstawia się to zaburzenie do tego zlinearyzowanego równania ruchu, co pozwala na napisanie równania algebraicznego na wartości własne $\sigma(\alpha; Re)$ i określenia ich położenia na płaszczyźnie zespolonej. Jeżeli wszystkie wartości leżą w dolnej półpłaszczyźnie, $\sigma_i < 0$, to zagadnienie jest stabilne, jeżeli chociaż jedna wartość własna położona jest w górnej półpłaszczyźnie, $\sigma_i > 0$, to zaburzenia będą wzrastały eksponentalnie z czasem i przepływ jest niestabilny. Metoda nieskończenie małych zaburzeń zaczęła być rozwijana intensywnie od czasów słynnego eksperymentu Reynoldsa, który wprowadził podział przepływów na laminarne i turbulenty. Już wtedy Reynolds zauważył, że zabarwione strugi zależą „od małych zaburzeń” i przejście do turbulencji może zachodzić dla różnych wartości liczb Reynoldsa. Metoda odniosła szereg spektakularnych sukcesów. Jednak dla elementarnych przepływów, do których zaliczane są płaski przepływ Couett’a, płaski przepływ Poiseuille’a jak również przepływ Poiseuille’a w rurze daje ona niezadawalające wyniki. Dla płaskiego przepływu Poiseuille’a otrzymano, słynną już krytyczną liczbę Reynoldsa równą $Re = 5772.22$ ($\alpha = 1.02$) (Orszag, 1971), co jest w znaczącej niezgodności z praktyką, gdzie przejście do turbulencji obserwuje się już dla $Re \approx 1000$. Płaski przepływ Couett’a i przepływ w rurze są - według liniowej teorii stabilności - zawsze stabilne. Ta trudność otrzymania właściwych wartości krytycznych liczb Reynoldsa wiąże się ze specyficznymi własnościami operatora różniczkowego zlinearyzowanego równania Naviera-Stokesa.

Uważa się, że przejście do turbulencji przy wzroście liczby Reynoldsa, w wyżej wymienionych przepływach, odbywa się, w trzech, czterech etapach. Najpierw, ze wzrostem liczby Reynoldsa, przy $Re > Re_{kr}$ następuje utrata stabilności przepływu pierwotnego i rozwiązanie osiąga drugą stabilną formę (układ bifurkuje do nowego stabilnego stanu) itp. Przy przejściu do następnego stanu następuje komplikacja przepływu. Po kilku kolejnych bifurkacjach otrzymuje się rozwinięty przepływ turbulentny.

W celu poszukiwania wartości krytycznych wartości liczb Reynoldsa i wartości własnych $\sigma(\alpha; Re)$ Doktorant posłużył się podejściem obliczeniowym rozwiązując zlinearyzowany układ równań ruchu płynu. Wykorzystując możliwości programu Nektar+ rozwiązywał zlinearyzowane równia „dla odpowiednio dobranych zaburzeń”. Zarejestrowana ewolucja rozwoju zaburzeń pozwoliła na oszacowanie wartości współczynników $\sigma = \sigma_r + i\sigma_i$ przy czym częstotliwość σ_r była wyznaczona drogą analizy czasowej zmiany fluktuacji prędkości, natomiast współczynnik wzrostu σ_i przez analizę wzrostu energii kinetycznej. Uważam, że ta część procesu obliczeniowego jest nowatorska jednak opisana jest niejasno.

Doktorant najpierw przeprowadził badania wpływu sinusoidalnego i zorientowanego poprzecznie pofalowanie ścian kanału, dla płaskiego przepływu Poiseuille’a. Przepływ wymuszony jest gradientem ciśnienia. Odbywa się wzdłuż sinusoidalnych rowków w kierunku osi z, oś x jest prostopadła do osi z, również z okresowymi warunki przepływu. Zbadano, jak zachowuje się strumień objętości w stosunku do strumienia w kanale gładkim ($\frac{q}{q_r}$) w zależności od długości fali λ_α (pofałdowania ściany) w kierunku osi x oraz amplitudy rowków S na ścianie. Stwierdzono, że im α

mniejsza (długość fali λ_α duża) a amplituda rowków duża ($S=0.9$) to stosunek $\frac{q}{q_r}$ „ jest prawie 2,5 razy większy niż dla przepływu ze ścianami gładkimi. Pozwoliło to na wskazanie obszaru na płaszczyźnie $S(\alpha)$, wartości parametrów (S, α) gdzie następuje redukcja oporów hydraulicznych. Doktorant opracował wykresy przedstawiające zależności współczynnika wzmocnienia σ_i od długości fali zaburzającej kształt ściany w kierunku osi z λ_β $\sigma_i(\beta)$, $\beta = 2\pi/\lambda_\beta$, zgodną z kierunkiem przepływu, dla różnych Reynoldsa i długości fali zaburzającej (pofalowania) $\alpha = 2\pi/\lambda_\alpha$ w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu. Z wykresu $\sigma_i(S)$, gdzie S jest amplitudą pofalowania ścian można odczytać, że dla $S \approx 0.18$, σ_i przyjmuje wartość dodatnią i następuje utrata stabilności. Krytyczna liczba Reynoldsa na skutek pofalowania ścian znacząco została zredukowana $Re_{cr} \approx 56 - 500$ zależy od amplitudy S pofalowania ścian, a współczynnik wzmocnienia istotnie zależy od ilorazu $\frac{\beta}{\alpha}$ gdzie α jest liczbą falową dla ściany w kierunku osi x prostopadłym do kierunku przepływu. Doktorant przedstawił również zależność krytycznej liczby Reynoldsa od długości zaburzenia zarówno β (wzdłuż osi z) jak i α , oraz od amplitud tych zaburzeń. Podobne badania zostały przeprowadzone dla kanału prostokątnego, gdzie ściany boczne pozostawały gładkie. Ponieważ przepływ odbywa się w kanale o szerokości L przeprowadzono badania jak szerokość kanału wpływa na charakterystyczne parametry (σ_r, σ_i) niestabilności, jak wpływa liczba sekcji $\lambda_\alpha = \frac{L}{n}$, $\alpha = \frac{2\pi n}{L}$ i amplituda pofalowania ścian S . Zauważono, że jeżeli liczba sekcji n wrasta ($n \approx 200$), to nierówności wynikające z pofalowania ścian nie są penetrowane przez poruszający się płyn. Doktorant sporządził wykresy pokazujące jak współczynnik wzmocnienia σ_i zależy od szerokości kanału L , liczby sekcji n , amplitudy pofalowania ścian S oraz liczby Reynoldsa. Wyznaczył obszary dla wartości parametrów, w których można spodziewać się redukcji oporu hydraulicznego. Przeprowadzone badania są bardzo szczegółowe i mają implikacje praktyczne. W tym rozdziale przeprowadzono badania również dla liczb Reynoldsa większej od krytycznej, po utracie stabilności wynikającej z liniowej teorii. Do tego celu wykorzystano program rozwiązujący kompletny układ równań Naviera-Stokesa. Jako warunek początkowy przyjęto zaburzony krytycznie przepływ bazowy dobierając odpowiednio zaburzenie z dostatecznie małą amplitudą. Proces przejściowy zakończył się nowym rozwiązaniem nazwanym przez doktoranta stanem nasycenia nieliniowego. Wykreślono również trójwymiarowe struktury wirowe dla stanu nieliniowego. Struktury wirowe były zidentyfikowane z użyciem Q –criterion.. Zaprezentowane wyniki uważam za bardzo interesujące. W rozdziale 5 przeprowadzono również badania nad wpływem kształtu rowków na opór hydrauliczny i wpływ ich kształtu na krytyczną liczbę Reynoldsa. W rozdziale 6 podjęto próbę oszacowania zdolności mieszania przepływu w po przekroczeniu krytycznej liczby Reynoldsa. Dokonano tego przez wprowadzenie do przepływu pasywnych cząstek, które podlegają dyfuzji. Myślę, że aby zademonstrować mieszanie wywołane komplikacją przepływu spowodowaną utratą stabilności bardziej przekonująco byłoby postąpić się całkiem pasywnymi cząstkami Lagrange’a unoszonymi przez przepływ bez uwzględniania dyfuzji.

UWAGI KRYTYCZNE I ZAPYTANIA

1. Manuskrypt pracy doktorskiej został wydany w postaci książki. Jest to fakt korzystny ze względu na poręczność i zwartość formatu książkowego. Jednak w przypadku książki należy zadbać również o jakość składu. Elementarne wymogi takie składu wymagają, aby wiersze nie kończyły się na łącznikach np. a, is, at itp. Nie należy łamać zdania w ten sposób aby myśl wiodąca zdania przechodziła na drugą stronę i kończyła akapit, np. na stronie 10 wraz „*a posteriori*” został podzielony na *a* oraz *posteriori*, które znalazło się już w następnej linii; na stronie 18 podpis pod rysunkiem kończy się pojedynczą literą S w nowej linii; na stronie 21 strona kończy się literą „a” a koniec zdania znajduje się między rysunkami na stronie następnej; na stronach 23 i 29 wiersze kończą się Figure , a numery rysunków znalazły się na stronie następnej. Strona 31 kończy się „at”, a zdanie jest dokończony dwie strony dalej, itd. Wygląda to amatersko, w złym znaczeniu tego słowa. Przy odrobinie staranności (oraz dodatkowej pracy) można było tego uniknąć. Należało też zadbać o to, aby podpisy pod rysunkami były drukowane nieco mniejszą czcionką od czcionki tekstu zasadniczego. Zapobiegłoby to zlewaniu się właściwego tekstu z podpisami, Jest to przy czytaniu pracy nużące i irytujące.
2. Jak zadbano o to, aby „*initial form of perturbation amplitude (u_p, p_p) closely approximate the shape of the unstable mode*” (str. 11)? W jakim sensie rozumiana jest ta bliskość kształtu? Czy można w jawny sposób napisać wzór na formę zaburzenia początkowego? Proszę wyjaśnić jak dobierano częstotliwość i amplitudę zaburzenia, aby otrzymać zaburzenie prowadzące do niestabilności mierzoną wzrostem energii kinetycznej.
3. Można się domyślać, że amplituda rozwinięcia w szereg Fouriera (wzór 2.9) była dostarczana przez program Nektar++. Czy znany jest wzór na tę amplitudę \hat{u}_k ?
4. Nie zaproponowano żadnych miar redukcji oporów tarcia. W pracy zamiennie używa się „drag reduction” albo „hydraulic resistance reduction”. Czy to oznacza to samo? Czy próbowano utworzyć miarę strat hydraulicznych przez analogię do wzoru Darcy- Weisbacha?
5. Doktorant pisze, że w przypadku ścian pofalowanych fale Tollimena-Schlichtinga (TS) są trójwymiarowe. Jest to stwierdzenie, które należało pokazać na wykresach. Ponadto w pracy przewija się pojęcie niestabilności Squire’a (np. str. 22, 23). Doktorant nie tłumaczy jakie znaczenie miały te mody w kontekście obecnej pracy.
6. W rozdziale 3.5 (Saturation and unstable modes) nie wspomniano, że do wyników prezentowanych w tym rozdziale był wykorzystywany program do rozwiązywania kompletnego układu równań Naviera-Stokesa . Czy to miało miejsce?

PODSUMOWANIE

Uważam, że zakres badań jaki przeprowadził doktorant jest bardzo szeroki i szczegółowy. Doktorant przyjął swoją technikę pracy nad niestabilnością hydrodynamiczną wykorzystując nowoczesny Solver Nektar++, który opiera się na metodzie elementu spektralnego wysokiego rzędu.

Wyniki numeryczne odnoszące się do liniowej teorii stabilności i wpływu pofalowania ścian potwierdziły też możliwość znaczącego obniżenia krytycznej liczby Reynolds poprzez dobór amplitudy i częstości fali zaburzającej kształt ścian.

Wyniki dotyczące zakresu nieliniowego, po utracie stabilności, uważam za nowe i bardzo ciekawe.

Doktorant wykazał, że możliwa jest poprawa własności mieszających przepływu poprzez sprowokowanie utraty stabilności przepływu podstawowego wprowadzając pofalowanie ścian w zakresie niskich liczb Reynoldsa. Wskazał na możliwość takiego doboru parametrów rowków, które nie będą powiększały oporów hydraulicznych.

Wykazał się bardzo dobrą znajomością zagadnień niestabilności hydrodynamicznej

Uważam, że praca zawiera duży ładunek poznania naukowego. Przeprowadzone badania odnoszą się do szerokiego zakresu zmian parametrów i na pewno były czasochłonne. Wyniki dwóch rozdziałów pracy, trzeciego i czwartego były opublikowane w bardzo dobrym czasopiśmie związanym z mechaniką płynów (Physics of Fluids, 2017, 2018). Dlatego wnioskuję do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej o wyróżnienie pracy.

Uważam, że praca spełnia wymogi ustawy o stopniach i tytułach naukowych w dziedzinie Nauk Technicznych (ustawa o tytule i stopniach naukowych z dn.13 marca 2003r.) w dyscyplinie Mechanika i wnioskuję do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

